

## Beschreibung

Verfahren und Anordnung sowie Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln und Computerprogramm-Produkt zur Ermittlung einer ausgewählten Position einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz

Die Erfindung betrifft eine Ermittlung einer Position einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz (Lokalisierung).

Mit zunehmender Verbreitung mobiler Kommunikation nimmt auch eine Nachfrage nach zusätzlichen Dienstleistungen, sogenannten "services", bei Mobilfunksystemen zu.

Unter "Location Based Services" werden dabei zusätzliche Dienstleistungen von Mobilfunkbetreibern verstanden, welche Nutzern von den Mobilfunksystemen ortsgebunden, d.h. abhängig von einer Position oder einem Standort des jeweiligen Nutzers, angeboten bzw. bereitgestellt werden, beispielsweise orts- oder entfernungsabhängige Nutzungstarife oder Orientierungshilfen für Rettungseinsätze oder Suchdienste.

Grundlegend für einen "Location Based Service" ist demzufolge eine Lokalisierung oder Positionsermittlung des jeweiligen Nutzers bzw. dessen mobilen Kommunikationsgeräts.

Für eine solche Lokalisierung von mobilen Kommunikationsgeräten in Kommunikationsnetze sind verschiedene Techniken bekannt, beispielsweise eine Positionsermittlung auf Basis einer Laufzeitbestimmung bzw. Laufzeitmessung von Kommunikationssignalen von einem mobilen Kommunikationsgerät zu einer Basisstation eines Kommunikationsnetzes ([1], [2]) oder eine Lokalisierung mittels satellitengestützter Systeme, wie ein GPS.

Das aus [2] bekannte, Laufzeit basierte Positionsermittlungs-  
verfahren wird für ein Mobiltelefon, im allgemeinen einer Mo-  
bilstation, in einem GSM-Kommunikationsnetz (= Global System  
for Mobile Communications) ([7], [8], [9]) gemäß einer TDMA-  
5 Mobilfunk-Technik (Time Division Multiple Access-Mobilfunk)  
durchgeführt.

Einer einzelnen Mobilstation, die sich bei einer ortsfesten  
Basisstation (gesprächsführenden Basisstation) eingebucht  
10 hat, wird bei dieser eine derzeit freie Zeitlage in einem  
TDMA-Rahmen zugeteilt.

Zu dieser Zeitlage gehen die für die betreffende Mobilstation  
bestimmten Kommunikationssignale in Signalpaketen, sogenann-  
15 ten bursts, mit einer Länge von 15/26ms von der Basisstation  
ab, beziehungsweise müssen die von der Mobilstation gesende-  
ten Kommunikationssignale bzw. bursts an der Basisstation  
eintreffen.

20 Die von der Basisstation emittierten Kommunikationssignale  
finden ihren Weg zur Mobilstation aufgrund von Streuungen ü-  
ber unterschiedliche Wege (Mehrfachausbreitungen), wobei sie  
frequenzabhängig gedämpft werden.

25 Eine Empfangsfeldstärke der von der Mobilstation empfangenen  
Kommunikationssignale ist somit nicht nur von einer Entfer-  
nung der Mobilstation von der Basisstation, sondern auch von  
der Frequenz und topographischen Gegebenheiten zwischen Mo-  
bilstation und Basisstation abhängig. Deshalb werden die ein-  
30 zeln Datenpakete auf verschiedenen Trägerfrequenzen ver-  
schickt, wodurch selektive Störungen einer Frequenz auf meh-  
rere Teilnehmer verteilt werden können.

Dafür ist allerdings eine präzise Synchronisierung zwischen  
35 Mobilstation und Basisstation notwendig. Diese Synchronisie-  
rung wird durch eine Mobilität eines Nutzers zusätzlich er-  
schwert, weil die Mobilstation sich nun in sich ändernden

Entfernungen zur Basisstation befindet und ihre Kommunikationssignale unterschiedliche Laufzeiten aufweisen.

Um die unterschiedlichen Laufzeiten auszugleichen und der Basisstation rahmensynchrone Daten liefern zu können, misst die Mobilstation die Signallaufzeit zur Basisstation und korrigiert dadurch einen Sendebeginn ihrer bursts.

Die Signallaufzeit wird in einem sogenannten "timing advance" (TA) codiert und weist eine Abhängigkeit zur Entfernung zwischen Mobilstation und gesprächsführenden Basisstation auf.

Für das TA stehen 64 Stufen zur Verfügung, die mit Werten 0 bis 63 (bit-)codiert werden und die Laufzeit repräsentieren.

Da Positionen von Basisstationen bekannt sind, kann aus einem TA bzw. aus der Signallaufzeit auf die Position der Mobilstation geschlossen werden.

Eine Messgenauigkeit bei der Laufzeitbestimmung beträgt eine Bitdauer, also in GSM 48/13  $\mu$ s, was einer einfachen Weglänge von etwa 554m entspricht.

Aus [3] ist eine Positionsermittlung einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem UMTS-Netz (= Universal Mobile Telecommunication System-Netz) bekannt.

Bei dem entsprechenden UMTS- Mobilfunkstandard, auf welchem das UMTS-Netz basiert, ist eine Positionsermittlung eines Mobilfunkgerätes bereits explizit im Standard enthalten bzw. wird durch diesen gefordert (TS 25.305 V3.1.0: stage 2 "Functional Specification of Location Services in UTRAN" (release 99), 3GPP TSG-RAN-WG2, 2000).

Aus [4], [5] und [6] sind weitere Verfahren zur Lokalisierung einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz bekannt.

Aus [10] ist ein nichtlineares Filter, ein Prior Density Splitting Mixture Estimator (PDSME), bekannt.

- 5 Dieses nichtlineare Filter, dieser PDSME, basiert auf neue Gaussche Mischfilter-Algorithmen für nichtlineare Systemzustandsgleichungen und/oder nichtlineare Messgleichungen.

10 Üblicherweise treten Linearisierungsfehler auf, wenn die nichtlinearen Systemzustandsgleichungen und/oder die nichtlinearen Messgleichungen durch Linearisierungen ersetzt werden bei Anwendung von linearen Filtertechniken.

15 Der PDSME bewirkt eine Reduktion dieser Linearisierungsfehler durch Splitten der a priori Dichte in mehrere Gaussche Mischkomponenten mit jeweils kleineren Kovarianzen.

20 Der PDSME kann angewandt werden sowohl für einen sogenannten "Prediction Step" bei den nichtlinearen Systemzustandsgleichungen als auch für einen sogenannten "Filter Step" bei den nichtlinearen Messgleichungen.

25 Weiter ist aus [10] bekannt eine Messung für den Linearisierungsfehler, die vergleichbar einer Kullback-Leibler-Distanz ist. Darüber kann eine gewünschte Abschätzungsgüte bei dem PDSME eingestellt werden. Durch Beschränkung einer maximalen Anzahl von Mischkomponenten bei dem PDSME kann eine obere Grenze für einen Rechenaufwand angegeben werden.

30 Die genannten Lokalisierungsverfahren weisen unter anderem die Nachteile auf, dass die durch sie ermittelten Positionen der mobilen Kommunikationseinrichtungen ungenau und demzufolge mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Genauere Verfahren erfordern allerdings aufwendige Zusatzeinrichtungen und  
35 kostspielige Modifikationen an den bzw. der Kommunikationsnetze und Kommunikationseinrichtungen.

Somit liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine genaue und mit möglichst geringen Unsicherheiten behaftete Lokalisierung einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz zu ermöglichen, welche möglichst einfach und kostengünstig realisiert werden kann.

Diese Aufgaben werden durch das Verfahren und die Anordnung sowie durch das Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln und das Computerprogramm-Produkt zur Ermittlung einer ausgewählten Position einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz mit den Merkmalen gemäß dem jeweiligen unabhängigen Patentanspruch gelöst.

Bei dem Verfahren zur Ermittlung einer ausgewählten Position einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz mit mindestens einer ersten Basisstation, eingerichtet zu einer ersten Kommunikation mit der mobilen Kommunikationseinrichtung mittels erster Kommunikationssignale, wird ein nichtlineares Kommunikationsmodell mit einem deterministischen Anteil und einem stochastischen Anteil verwendet.

Dieses nichtlineare Kommunikationsmodell umfasst einen deterministischen und einen stochastischen Anteil

- welcher deterministische Anteil eine Abhängigkeit zwischen Kommunikationssignale einer Basisstation und Positionen der mobilen Kommunikationseinrichtung beschreibt und
- welcher stochastische Anteil eine Unsicherheit des deterministischen Anteils beschreibt.

Unter Verwendung des zu der ausgewählten Position zugehörigen ersten Kommunikationssignals der ersten Basisstation und dem nichtlinearen Kommunikationsmodell wird die ausgewählte Position ermittelt, wobei bei der Ermittlung eine nichtlineare Bayesianische Filtertechnik angewandt wird.

Durch Anwendung der nichtlinearen Bayesianische Filtertechnik auf das Kommunikationsmodell bzw. auf das Kommunikationssig-

nal wird ein mögliches Aufenthaltsgebiet der ausgewählten Position bestimmt, aus welchem schließlich die ausgewählte Position bestimmt wird.

5 Unter der nichtlinearen Bayesianischen Filtertechnik bei der Erfindung ist im allgemeinen die Technik wie folgt zu verstehen:

- die Bayesianische Filtertechnik entspricht einer zeitlichen Fortschreibung bzw. Veränderung (auch Berechnung der  
10 zeitlichen Veränderung) bekannter Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Systemzustände und Systemausgänge durch das Vorliegen neuer Messwerte.

Dem erfinderischen Lokalisierungsverfahren liegt die Idee  
15 zugrunde, aus in Kommunikationsnetzen, wie zum Beispiel WLAN, GSM, DECT-Netzen, zur Verfügung stehenden Kommunikationssignalen zwischen mindestens einer Basisstation (Sender) und einer Mobilstation (Empfänger) entfernungsrelevante Parameter und daraus geographische Informationen, in diesem Fall ein  
20 mögliches Aufenthalts- oder Entfernungsgebiet bzw. Unsicherheitsgebiet der Mobilstation, zu gewinnen.

Anzumerken ist, dass Sender und Empfänger der Kommunikationssignale technisch auch vertauscht realisiert sein können. Die  
25 erfinderische Vorgehensweise bleibt davon unberührt. In diesem Fall wäre die Basisstation der Empfänger und die Mobilstation der Sender der in Rede stehenden Kommunikationssignale.

30 Weiter liegt der dem erfinderischen Lokalisierungsverfahren die Erkenntnis zugrunde, dass die von der Mobilstation empfangenen Kommunikationssignale abhängig sind von der geographischen Position der Mobilstation im Kommunikationsnetz bzw. zu der Basisstation.

35

Diese Abhängigkeit zwischen den empfangenen Kommunikationssignalen bzw. zwischen Signalstärken der (von der Basisstation)

on) empfangenen Kommunikationssignale und der geographischen Position der Mobilstation kann durch sogenannte Messgleichungen, d.h. durch das Kommunikationsmodell, beschrieben werden.

- 5 Diese Messgleichungen bzw. das Kommunikationsmodell umfassen einen deterministischen Anteil, welcher deterministische Anteil eine Abhängigkeit zwischen dem empfangenen Kommunikationssignal und der Position der Mobilstation beschreibt, und einen stochastischen Anteil, welcher stochastische Anteil ei-  
10 ne Unsicherheit des deterministischen Anteils beschreibt.

Diese Unsicherheit kann beispielsweise eine solche des Kommunikationssignals und/oder eine solche der erwähnten Abhängigkeit (Modellunsicherheit) sein.

15

- Die erfindungsgemäß auf diese Messgleichungen bzw. das Kommunikationsmodell angewandte nichtlineare Bayesianische Filtertechnik zur Bestimmung des möglichen Aufenthaltsgebiets der Mobilstation bzw. der ausgewählten Position verbessert die  
20 Qualität der Lokalisierung verglichen mit üblichen Filtertechniken wie einem Extended Kalman Filter (EKF) erheblich.

- Die Anwendung der nichtlinearen Bayesianischen Filtertechnik kann in einem sogenannten "Filter Step" einmalig oder iterativ mehrmalig erfolgen.  
25

- In diesem möglichen Aufenthaltsgebiet bzw. Unsicherheitsgebiet, beschrieben unter Verwendung stochastischer Größen, wie einem Mittelwert und/oder einer Varianz, wird schließlich die  
30 Mobilstation bzw. deren Position vermutet.

- Diese Vermutung kann mathematisch formuliert werden durch einen Kennwert des möglichen Aufenthalts- bzw. Unsicherheitsgebiets, wie einem Schwerpunkt oder einem Erwartungswert. Dieser kann dann als Schätzung für die ausgewählte Position der  
35 Mobilstation verwendet wird.

Ein besonderer Vorteil der Erfindung liegt darin, dass die Lokalisierung auf Basis von Kommunikationssignalen und bekannten Positionen von Basisstationen durchgeführt wird, welche in einem normalen Betrieb bei einem Mobilfunksystem anfallen und dort zur Verfügung stehen. Dadurch kann auf aufwendige Änderungen und Erweiterungen sowie Zusatzmessungen bestehender Mobilfunksysteme bzw. bei bestehenden Mobilfunksystemen verzichtet werden.

10 Das Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln ist eingerichtet, um alle Schritte gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Ermittlung einer Position, d.h. dem erfindungsgemäßen Lokalisierungsverfahren, durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird.

15 Das Computerprogramm-Produkt mit auf einem maschinenlesbaren Träger gespeicherten Programmcode-Mitteln ist eingerichtet, um alle Schritte gemäß dem erfindungsgemäßen Lokalisierungsverfahren durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer  
20 ausgeführt wird.

Die Anordnung sowie das Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln, eingerichtet um alle Schritte gemäß dem erfinderischen Lokalisierungsverfahren durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird, sowie das Computerprogramm-Produkt mit auf einem maschinenlesbaren Träger gespeicherten Programmcode-Mitteln, eingerichtet um alle Schritte gemäß dem erfinderischen Lokalisierungsverfahren durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird, sind insbesondere geeignet zur Durchführung des erfindungsgemäßen Lokalisierungsverfahrens oder einer seiner nachfolgend erläuterten Weiterbildungen.

30 Bevorzugte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.  
35



Die im weiteren beschriebenen Weiterbildungen beziehen sich sowohl auf die Verfahren als auch auf die Anordnung.

5 Die Erfindung und die im weiteren beschriebenen Weiterbildungen können sowohl in Software als auch in Hardware, beispielsweise unter Verwendung einer speziellen elektrischen Schaltung, realisiert werden.

10 Ferner ist eine Realisierung der Erfindung oder einer im weiteren beschriebenen Weiterbildung möglich durch ein computerlesbares Speichermedium, auf welchem das Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln gespeichert ist, welches die Erfindung oder Weiterbildung ausführt.

15 Auch kann die Erfindung oder jede im weiteren beschriebene Weiterbildung durch ein Computerprogrammerzeugnis realisiert sein, welches ein Speichermedium aufweist, auf welchem das Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln gespeichert ist, welches die Erfindung oder Weiterbildung ausführt.

20 Bei einer Kommunikation in einem Kommunikationsnetz zwischen einer mobilen Kommunikationseinrichtung (Mobilstation), beispielsweise einem Mobiltelefon, und einer Basisstation, beispielsweise einer Rundantenne bzw. einem Rundstrahler oder  
25 einer bzw. mehrerer sektoraler Antennen, werden Daten, die Kommunikationssignale, in Signalpaketen, sogenannten bursts, übertragen.

30 Basierend auf den bzw. unter Verwendung der übertragenen Kommunikationssignalen bzw. Signalpaketen lassen sich verschiedene entfernungsrelevante Parameter ermitteln, welche wiederum als Grundlage für die Ermittlung von den möglichen Aufenthalts- bzw. Entfernungsgebieten herangezogen werden können.

35 Ein solcher entfernungsrelevanter, d.h. entfernungsabhängiger, Parameter ist beispielsweise eine Feldstärke eines Signalpakets.

Die Feldstärke weist eine natürliche Abhängigkeit zur Entfernung zwischen der Mobilstation und der (gesprächsführenden) Basisstation auf und liefert demzufolge eine Information über das mögliche Aufenthaltsgebiet bzw. Entfernungsgebiet (Unsicherheitsgebiet) der Mobilstation.

Diese Abhängigkeit zwischen Feldstärke und Entfernung kann durch physikalische Modelle, welche ein Ausbreitungsverhalten von Signalen beschreiben, beschrieben werden.

Für die Ermittlung der ausgewählten Position kann ein Kennwert des möglichen Aufenthalts- bzw. Unsicherheitsgebiets bestimmt werden, wie ein Schwerpunkt oder ein Erwartungswert, welcher dann als Schätzung für die ausgewählte Position der Mobilstation verwendet wird.

Die Qualität der Lokalisierung kann weiter verbessert werden unter Verwendung eines Benutzermodells, welches eine Bewegung der mobilen Kommunikationseinrichtung beschreibt. So kann ein solches Benutzermodell eine maximale Schrittweite bzw. Bewegungsdistanz für einen vorgegebenen Zeitschritt begrenzen.

Die Erfindung eignet sich insbesondere zu einem Einsatz im Umfeld eines digitalen, zellularen Mobilfunksystems, wie eines GSM-Netzes, und dort beispielsweise zur Lokalisierung eines GSM-Telefons (Mobiltelefon).

Dabei werden bei dem Einsatz der Erfindung nur die dem Mobiltelefon zur Verfügung stehenden Daten verwenden, wobei weder am GSM-Netz noch an Mobilstationen in dem GSM-Netz kostspielige Änderungen vorzunehmen sind.

Beispielsweise sind bekannt von einem GSM-Netz die Positionen der einzelnen Basisstationen und deren Antennen sowie deren Charakteristika, welche Auskunft über das Versorgungsgebiet der jeweiligen Antenne gibt.

Das Mobiltelefon seinerseits steht für einen korrekten Verbindungsaufbau immer in Kontakt mit den

empfangbaren Antennen, um die am besten für ein Gespräch geeignete Antenne vom Netz zugeteilt zu bekommen. Dazu misst es unter anderem die Empfangsfeldstärke der empfangbaren Antennen sowie bestimmt Signallaufzeiten, die dann ebenfalls bekannt sind.

- 10 Auf Basis dieser vorliegenden Informationen erfolgt dann die Lokalisierung des Mobiltelefons gemäß der erfinderischen Vorgehensweise.

Auch eignet sich die Erfindung zu einem Einsatz im Umfeld weiterer digitaler, zellularen Mobilfunksysteme, wie eines WLAN oder eines DECT-Netzes [11], und dort beispielsweise zur Lokalisierung eines DECT-Mobiltelefons.

In Figuren ist ein Ausführungsbeispiel der Erfindung dargestellt, welches im weiteren näher erläutert wird. Das Ausführungsbeispiel ist dabei unterteilt in einen grundlegenden Teil, welcher Grundlagen der erfinderischen Vorgehensweise darstellt, und einen angewandten Teil, welcher anhand eines konkreten Zahlenbeispiels die erfinderische Vorgehensweise sowie Ergebnisse verdeutlicht bzw. angibt.

Es zeigen

Figur 1 eine Skizze, in welcher eine angenommene lineare Näherung für das nichtlineare Kommunikationsmodell dargestellt ist;

Figur 2 eine Skizze, in welcher die Unsicherheit der Kommunikationssignale durch rauschen dargestellt ist;

Figur 3 eine Skizze, in welcher ein Überblick über den PDSME-Algorithmus mit einem linearisierten Fiterstep (obe-

rer Ausschnitt) und einem Prognoseschritt (Predik-  
tionsstep) (unterer Ausschnitt) dargestellt ist;

Figuren 4a und b Skizzen, in welchen ein Evaluierungs-  
Szenario für die Lokalisierung gemäß dem Ausführungs-  
beispiel dargestellt ist;

Figuren 5a und b Skizzen, in welchen eine Lokalisierung unter  
Verwendung eines Extended Kalman Filters dargestellt  
ist (erster Filterschritt Fig. 5a; 170-ter Filter-  
schritt Fig. 5b);

Figuren 6a und b Skizzen, in welchen eine Lokalisierung unter  
Verwendung des PDSME gemäß dem Ausführungsbeispiel  
dargestellt ist (erster Filterschritt Fig. 6a; 170-  
ter Filterschritt Fig. 6b;

Figuren 7a und b Skizzen, in welchen Ergebnisse der EKF-  
Filterung und der PDSME-Filterung gemäß dem Ausfüh-  
rungsbeispiel in Bezug auf die korrekten Ergebnisse  
dargestellt sind;

Figur 8 eine Skizze, in welcher eine Anzahl von Gausschen  
Mischkomponenten in einer Abhängigkeit von Filter-  
schritten dargestellt sind.

**Ausführungsbeispiel: Lokalisierung eines DECT-Mobiltelefons  
in einem DECT-Netz basierend auf einer nichtlinearen Filter-  
technik**

Grundlagen

Nachfolgend wird die Anwendung einer nichtlinearen Bayesiani-  
schen Filtertechnik bei der Lokalisierung eines mobilen Funk-  
telefons beschrieben. Die Anwendung wird beschrieben am Bei-

spiel einer Lokalisierung eines DECT-Mobiltelefons in einem DECT-Netz mit mehreren Basisstationen.

5 Signalstärken (Feldstärken) der von einem Mobiltelefon empfangenen und dort gemessenen Kommunikationssignale (einer diese Signale aussendenden Basisstation) sind abhängig von der Position des Mobiltelefons bezüglich der die Kommunikations-  
10 onssignale aussendenden Basisstation. Dieser Zusammenhang wird beschrieben durch nicht lineare Messgleichungen (nichtlineares Kommunikationsmodell).

Diese nicht linearen Messgleichungen bzw. dieses nicht lineare Kommunikationsmodell umfasst einen deterministischen Anteil, welcher die empfangenen Signalstärken als Funktion der  
15 Position beschreibt, und einen stochastischen Anteil, welcher Modellfehler und Messrauschen berücksichtigt.

Zusätzlich werden Benutzermodelle mit berücksichtigt, welche ein Wissen über eine (räumliche) Bewegung von Benutzern der  
20 Mobiltelefone mit einbringen.

Eine neue nichtlineare Filtertechnik, ein sogenannter "Prior Density Splitting Mixture Estimator" (PDSME), einordnbar als Gausscher Mischfilteralgorithmus, verbessert signifikant eine  
25 Lokalisierungsqualität verglichen mit Standardfiltertechniken, wie ein "Extended Kalman Filter" (EKF) (vgl. Figuren 5 bis 7).

Typische Anwendungen für Lokalisierungsaufgaben sind Positionsermittlungen mobiler Kommunikationseinrichtungen (Mobilgeräten) in WLANs, GSM-Netzen oder DECT-Netzen.  
30

Für die Positionsermittlung sollten dabei Informationen verwendbar sein, welche bereits während einer normalen Operationsphase, d.h. bei einer "normalen" Kommunikation zwischen  
35 Mobilgerät und Basisstation, zur Verfügung stehen.

Das aus [12] bekannte Lokalisierungsverfahren für Mobiltelefone in GSM-Netzen basiert auf ortsabhängige, von den Mobiltelefonen empfang- und dort messbare Signalstärken der von Basisstationen ausgesendeten Kommunikationssignale. Wegen der Ortsabhängigkeit sind diese charakteristisch für die Position des Signalempfängers, in diesem Fall für die Position des Mobiltelefons bzw. eines Benutzers des Mobiltelefons.

Während der normalen Operationsphase werden die empfangenen Signalstärken aller empfangbarer Kommunikationssignale der jeweiligen Sender (Basisstationen) durch das Mobiltelefon gemessen und verglichen. Dadurch wird ein sogenanntes Handover des Mobiltelefons zwischen verschiedenen Sendern bzw. Basisstationen gesteuert.

Basierend auf diese im Normalbetrieb anfallenden Messungen können Lokalisierungsverfahren entwickelt werden, um zusätzlich die Position des Mobiltelefons in Bezug auf die Sender bzw. im GSM-Netz zu ermitteln.

Aus [13] und [17] sind weitere Vorgehensweisen zur Lokalisierung mobiler Kommunikationseinrichtungen bekannt. Diese Vorgehensweise bei der Lokalisierung basieren auf einer Anwendung von nichtlinearen Zustandsschätzungen.

Nachfolgend wird die Anwendung einer neuen nichtlinearen Filtertechnik für die Lokalisierung von DECT-Mobiltelefonen beschrieben.

Um die Lokalisierung von Mobiltelefonen zu ermöglichen, wird, wie aus [18] bekannt ist, ein stochastisches Näherungsmodell für die Ausbreitung von Radiowellen oder empfangbaren Signalstärken von Kommunikationssignalen in einer Lokalisierungsumgebung identifiziert bzw. entwickelt.

Ein entsprechendes Ausbreitungsmodell kann auch grundsätzlich durch physikalische Ausbreitungsmodelle von elektromagnetischen Wellen erlangt werden.

- 5 Eine Anpassung rein physikalischer Ausbreitungsmodelle an reale (Lokalisierungs-)Umgebungen ist jedoch sehr kompliziert, da Reflexionen oder Interferenzen oder andere physikalische Phänomene die physikalisch angenommene Ausbreitung beeinflussen und verfälschen.

10

- Da reale Ausbreitungsparameter, welche die elektromagnetischen (Ausbreitung-)Eigenschaften in der realen Lokalisierungsumgebung, in welcher das Mobiltelefon zu lokalisieren ist, beschreiben, nur partiell bekannt bzw. bestimmbar sind, ist die Anwendung solcher physikalisch basierter Ausbreitungsmodelle für solche realen Anwendungen ausgeschlossen.

15

- Deshalb ist ein Ausbreitungsmodell, welches auf tatsächlichen Messungen der (logarithmierten) empfangenen Signalstärken der Kommunikationssignale in der tatsächlichen Lokalisierungsumgebung beruht bzw. sich daraus ableiten lässt, theoretischen physikalischen Ausbreitungsmodellen vorzuziehen.

20

- 25 Die Entwicklung eines solchen aus tatsächlichen Messungen abgeleiteten "Messmodell" bzw. Kommunikation- bzw. Ausbreitungsmodell erfordert ein Einmessen oder eine Kalibrierung im Rahmen dessen Parameter des Messmodells festgelegt werden.

- 30 Einmessen/Kalibrieren ("model generation phase")

35

Für ein solches Einmessen/Kalibrieren wird der Empfänger (benutzt im Sinne eines Messgerätes), d.h. das Mobiltelefon, an mehrere Positionen in der Lokalisierungsumgebung bewegt, beispielsweise an Gitterpunkten erhältlich durch Platzierung eines Gitters auf die Lokalisierungsumgebung.

An jedem Gitterpunkt werden die Feldstärken aller dort empfangbaren Basisstationen gemessen und in einer Karte der Lokalisierungsumgebung gespeichert. Auf diese Weise wird die Feldstärkenverteilung jeder Basisstation über die Lokalisierungsumgebung bestimmt. Die Feldstärkenverteilungen können durch das Messmodell modelliert werden.

Basierend auf diese Modellinformationen (und von an einer aktuellen Position gemessenen Feldstärken) kann dann die aktuelle, von einem Empfänger bzw. von dem Mobiltelefon in der Lokalisierungsumgebung eingenommenen Position bestimmt werden (Lokalisierung in einer "localisation phase").

Weiter wird nachfolgend beschrieben werden, wie ein stochastisches Messmodell in der model generation phase identifizierbar ist.

Dieses stochastische Messmodell besteht aus einer analytischen, deterministischen Messfunktion, welche die logarithmierte, empfangene Signalfeldstärke in Abhängigkeit von Positionskoordinaten beschreibt. Darüber hinaus wird ein stochastischer Anteil (Komponente) identifiziert, welcher Modellunsicherheit wie auch Messrauschen berücksichtigt.

Ein solcher stochastischer Ansatz bei der Lokalisierung berücksichtigt die Unsicherheiten bei der ermittelten Position durch Wahrscheinlichkeiten bzw. Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen.

Neben dem Messmodell für die empfangbaren Kommunikationssignale wird die Güte der Lokalisierung dadurch weiter verbessert, dass ein Benutzermodell mit eingebracht wird. Über dieses Benutzermodell kann Wissen über eine (räumliche und/oder zeitliche) Bewegung eines Benutzers mit berücksichtigt werden.



Durch solche Benutzermodelle können maximale "Schrittweiten" von Benutzern in einem Zeitschritt, welcher über zwei zugehörige bzw. korrespondierende Signalmessungen (am Anfang und am Ende des Zeitschritts) definiert wird, beschränkt ist.

5

Ein zusätzliche Verbesserung der Lokalisierungsgüte lässt sich erreichen durch rekursive Positionsermittlung durch Kombination mehrfacher verschiedener nacheinanderfolgender Messungen.

10

Der hier benutzte neue stochastische Ansatz bei der Lokalisierung führt zu nichtlinearen, mehrdimensionalen Messgleichungen. Eine exakte Lösung dieses Bayesianischen Filterproblems führt zu komplizierten nicht-Gausschen Wahrscheinlichkeitsdichten, welche die gesuchte Position mit ihren Unsicherheiten beschreiben.

15

Diese Wahrscheinlichkeitsdichte(-funktionen) können durch Gaussche Mischdichten [19], [20] angenähert werden.

20

Diese Annäherung wird hier durch einen neuentwickelten sogenannten "Prior Density Splitting Mixture Estimator" (PDSME) durchgeführt, der entwickelt wurde, um eine durch einen Anwender einstellbare Güte der Lokalisierung zu ermöglichen - im Gegensatz zu üblichen, nichtlinearen, bekannten Filtertechniken, wie einem Extended Kalman Filter (EKF).

25

Jedoch kann eine Angabe einer oberen Grenze für einen Rechenaufwand durch Beschränkung der Anzahl von anwendbaren Gausschen Mischkomponenten die Lokalisierungsgüte reduzieren. Darüber hinaus wird durch die Repräsentation von Dichten bei den Gausschen Mischungen eine rekursive Vorgehensweise sowohl bei den nichtlinearen "Predictions Steps" als auch bei den nichtlinearen "Filtersteps" möglich.

30

Weiter wird im ersten Teil beschrieben werden, wie das stochastische Lokalisierungsproblem formuliert werden kann. Die

35

deterministischen Anteile und die stochastischen Anteile des Messmodells werden nachfolgend erklärt werden. Die Anwendung von Bayesianischen Filteralgorithmen, basierend auf eine gaussischen Mischnäherung für die exakten Wahrscheinlichkeitsdichten verwendet in dem neuen PDSME wird beschrieben werden.

Im zweiten Teil werden Ergebnisse einer Lokalisierung eines DECT-Mobiltelefons in einem DECT-Netz dargestellt und die Güte der Lokalisierung unter Verwendung des PDMSE mit der unter Verwendung eines bekannten EKF verglichen werden.

#### Formulierung des Lokalisierungsproblems

Die Lokalisierungsaufgabe für ein mobile Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz kann in zwei Grundprobleme eingeteilt werden:

- 1) die Identifikation des Messmodells mit einem deterministischen und einen stochastischen Anteil in der model generation phase;
- 2) die Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsdichte der gesuchten Position in einem Bayesianischen Filterstep in der Lokalisierungsphase.

#### Das Messmodell

$$\hat{\mathbf{y}}_k = \begin{bmatrix} \hat{y}_{k,1} \\ \vdots \\ \hat{y}_{k,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}_k) \\ \vdots \\ h_N(\mathbf{x}_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \quad (1)$$

beschreibt die Messung der logarithmierten empfangenen Signalstärken

$$\hat{y}_{k,\zeta} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{k,\zeta}}{1mW} \right)$$

des  $\zeta$ -then Transmitters (Senders),  $\zeta = 1, \dots, N$ , als eine deterministische nichtlineare Funktion  $h_\zeta(\mathbf{x}_k)$  der Positionskoordinaten  $\mathbf{x}_k = [x_{1,k}, x_{2,k}]$  für jeden der  $N$  verschiedenen Sender.

Der stochastische Anteil  $\mathbf{v}_k$  des Messmodells wird repräsentiert durch eine additive Unsicherheit. Additive Unsicherhei-

ten im Messmodell der logarithmierten empfangenen Signalstärke entsprechen multiplikativen Unsicherheiten der Signalleistung  $P$ , welche auf einen Einfluss von unbestimmten Dämpfungen zurückzuführen sind.

5

Jeder Transmitter kann identifiziert werden über eine ihm eigenen ID, welche durch die Basisstation während einer Kommunikation übertragen wird.

- 10 Dadurch wird das Lokalisationsproblem erheblich vereinfacht, weil jeder Messwert direkt der zugehörigen nichtlinearen Messgleichung zugewiesen werden kann.

- 15 In der Lokalisierungsphase werden die nichtlinearen Filteralgorithmen in jedem Zeitschritt  $k$  angewandt. Jedoch können ohne die additiven Unsicherheiten  $v_k$  die impliziten, nichtlinearen Beziehungen zwischen dem Vektor mit den gemessenen logarithmierten empfangenen Signalstärken  $y_k$  der Transmitter und den Positionen  $x_k$  des Empfängers nur numerisch gelöst werden,
- 20 beispielweise durch eine Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Berücksichtigt man die Unsicherheiten mit, so können die Messgleichungen verwendet werden, um die gesuchte Position im Filterstep zu erneuern ("update").

- 25 Die weiter beschriebene Vorgehensweise bei der Lokalisierung basiert auf einer Näherung der exakten Lösung des bayesianischen Filtersteps durch Gaussche Mischdichten

$$f_x^p(\underline{x}_k) = \sum_{i=1}^L \omega_{x,k}^{p,i} \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \left\| \underline{x}_k - \underline{\mu}_{x,k}^{p,i} \right\|_{\left(C_{xx,k}^{p,i}\right)^{-1}}^2\right)}{\sqrt{(2\pi)^2 |C_{xx,k}^{p,i}|}}$$

- 30 mit  $L$  Komponenten, definiert durch nicht-negative Gewichte  $w$ , Erwartungswerte  $\mu$  und Kovarianzen  $C$ .

Ist der Messwert  $y$  verfügbar, so ergibt sich die exakte Lösung des Bayesianischen Filtersteps aus:

$$f_x^o(\underline{x}_k | \hat{y}_k, \zeta) = c f_x^p(\underline{x}_k) f_{v, \zeta}(\hat{y}_k, \zeta - h\zeta(\underline{x}_k))$$

mit der nichtlinearen Messfunktion  $h(x)$ , den additiven Unsicherheitsdichtefunktionen  $f(v)$  und eine Normalisierungskonstante  $c$ .

- 5 A priori Wissen über die gesuchte Position wird repräsentiert durch die Dichtefunktion  $f(x)$ .

Für jede neue Messung wird die vorangehende a posteriori Dichte  $f(x|y)$  interpretiert als neue a priori Dichte, so dass  
10 die gesuchte bzw. ermittelte Position rekursiv erneuert (update) werden kann.

Analog zum Bayesianischen Filterstep wird ein Predikti-  
onsstep, welcher zur Beschreibung des nichtlinearen Benutzer-  
15 modells

$$\underline{x}_{k+1} = \underline{a}_k(\underline{x}_k) + \underline{w}_k \quad (2)$$

verwendet wird, ebenso zur Näherung der exakten Dichte durch  
Gaussche Mischungen durchgeführt.

- 20 Die nichtlineare Funktion  $a(x)$  ist ein deterministisches Modell einer Benutzerbewegung. Unsicherheiten werden wieder durch additives Rauschen  $w$  berücksichtigt.

Stochastische Modellierung

25

Das Messmodell wird identifiziert über Messungen der logarithmierten Signalstärken für jeden Transmitter an Gitterpunkten eines Gitters,, welchen die Lokalisierungsumgebung abdeckt. Die deterministische ( $h(x)$ ) und die stochastische  
30 Komponente ( $v$ ) des Messmodells (1) werden vor der Lokalisierung identifiziert.

Der deterministisch, analytische Anteil  $h(x)$  ist eine Messgleichung, welche die empfangene Signalleistung als eine  
35 Funktion der Positionskoordinaten beschreibt. Der stochastische Anteil  $v$  ist ein Modell für die Unsicherheiten des deterministischen Anteils. Diese Unsicherheiten setzen sich

zusammen aus räumlichen Unsicherheiten entsprechend Modellfehlern und zeitliches Messrauschen.

Deterministisches Messmodell der logarithmierten empfangenen  
5 Signalstärken

Fig.1 zeigt, dass die Abnahme der logarithmierten, empfangenen Signalstärke über eine Distanz von mehreren Metern annähernd linear ist. In anderen Dokumenten werden ähnliche Annahmen bezüglich des Messmodells als "linear-loss-model" [24] oder "linear-scope-model" [18] bezeichnet.

Mathematisch lässt sich für zweidimensionale Positionskoordinaten  $\mathbf{x}$  richtungsabhängige lineare Abnahme der logarithmierten empfangenen Signalstärken beschreiben durch  $N$  unabhängige Messgleichungen

$$h_{\zeta}(\mathbf{x}_k) = -\sqrt{\|\mathbf{x}_k - \mathbf{m}_{\zeta}\|_{P_{\zeta}}^{-1}} + \Delta_{\zeta}. \quad (3)$$

Die Parameter  $\mathbf{m}_{\zeta}$  und  $P_{\zeta}$  der positiven semidefiniten quadratischen Form und der additive Offset  $\Delta_{\zeta}$  werden für jeden Transmitter  $\zeta = 1, \dots, N$  identifiziert.

Die  $6N$  Parameter  $\mathbf{m}_{\zeta}$ ,  $P_{\zeta}$  und  $\Delta_{\zeta}$  werden bestimmt durch eine Methode der kleinsten Fehlerquadrate, bei welcher die Abweichung zwischen dem angenäherten Messmodell und der gemessenen logarithmierten Signalstärken auf den Gitterpunkte, gemessen während der model generation phase, minimiert wird. Zur Reduktion des zeitlichen Messrauschens wird der Mittelwert über mehrere Messungen an jedem Gitterpunkt zur Berechnung des Durchschnitts der gemessenen Werte verwendet.

30 Stochastische Modellierung der Unsicherheiten

Das stochastische Unsicherheitsmodell berücksichtigt sowohl die Abweichung zwischen den angenäherten, im obigen beschriebenen Modell und der wahren Verteilung der logarithmierten empfangenen Signalstärken, gemessen auf den Gitterpunkten, und das zeitliche Messrauschen.

## Modellungsgewißheiten

Bei diesem Lokalisierungsansatz wird die Abweichung zwischen  
5 der wahren logarithmischen Empfangssignalleistung und dem deterministischen Messungsmodell  $h(\underline{x}_k)$  durch eine Gaußsche Rauschdichte mit Mittelwert  $\mu_{v,\zeta}^{(1)}$  und Standardabweichung  $\sigma_{v,\zeta}^{(1)}$  für jeden Sender beschrieben. Diese Gaußsche Ungewissheit ist eine Darstellung des Annäherungsfehlers der deterministischen  
10 Komponente des Messungsmodells über die gesamte Lokalisierungsumgebung. Als erstes stellt es die mittlere Abweichung über die Lokalisierungsumgebung zwischen dem Modell und der wahren Empfangsleistung aufgrund der unrichtigen Annahmen für den deterministischen Teil der Messungsgleichung dar. Die  
15 sich aus großen Abweichungen zwischen der wahren Empfangssignalleistung und dem Messungsmodell ergebenden Ungewissheiten sind in Fig. 1 dargestellt. Als zweites haben Messungen auch gezeigt, dass örtliche Abweichungen bestehen, die durch Reflektion, nichthomogene Ausbreitung der Funkwellen und In-  
20 terferenz verursacht sein könnten. Diese räumlichen Variationen der logarithmischen Empfangssignalleistung sind aus Fig. 2 ersichtlich, wo Messungen in einem Abstand von 2 cm gesammelt worden sind.

## Messrauschen

Zusätzlich zu räumlichen Variationen der Empfangssignalleistung kann zeitliches Messrauschen durch Auswertung einer Reihe von mehreren verschiedenen Messungen an einer festen Stelle  
30 le bestimmt werden. Dieses zeitliche Messrauschen ist ebenfalls in Fig. 2 für drei verschiedene Messungen der logarithmischen Empfangssignalleistung an jeder Messstelle dargestellt. Dieses Rauschen wird wiederum durch eine Gaußsche Dichte mit Mittelwert  $\mu_{v,\zeta}^{(2)}$  und Standardabweichung  $\sigma_{v,\zeta}^{(2)}$  angenähert.  
35

## Kombination von Modellungewisshheiten und Messrauschen

Um ein einfaches Modell mit den beiden im obigen beschriebenen Ungewissheiten zu erhalten, wird weiterhin angenommen, dass beide Ungewissheiten unabhängig sind. Sie können daher durch eine einzige Gaußsche Dichte  $f_{v,\zeta}(v_\zeta)$  für jeden Sender  $\zeta = 1, \dots, N$ , modelliert werden, die definiert wird durch den Mittelwert

$$\mu_{v,\zeta} = \mu_{v,\zeta}^{(1)} + \mu_{v,\zeta}^{(2)}$$

und die Standardabweichung

$$\sigma_{v,\zeta} = \sqrt{(\sigma_{v,\zeta}^{(1)})^2 + (\sigma_{v,\zeta}^{(2)})^2}.$$

Dieses Modell impliziert nicht nur unabhängige Ungewissheiten sondern es wird auch angenommen, dass beide Ungewissheiten beschrieben werden können, ohne jegliche Positionsabhängigkeit in Betracht zu ziehen.

## Filteralgorithmus

In diesem Abschnitt wird eine kurze Übersicht über den für die Lokalisierung von Funkkommunikationsvorrichtungen benutzten PDSME (Prior Density Splitting Mixture Estimator) gegeben. Zusätzlich wird eine Anpassung der in Abschnitt 3 abgeleiteten Messgleichungen  $h(\underline{x}_k)$  eingeführt, um die Berechnung des PDSME-Schätzers zu vereinfachen. Weiterhin wird ein Prädiktionsschritt für ein einfaches Benutzermodell dargestellt.

## Die PDSME-Messungsaktualisierung

Der in dieser Schrift dargestellte PDSME-Algorithmus für die Lokalisierung von Funkkommunikationsvorrichtungen beruht auf der Berechnung einer linearisierten Messungsaktualisierung für Gaußsche Mischungsdichten. Der Messungsaktualisierungsschritt dieses Filteralgorithmus ist in einem Blockschaltbild im oberen Teil der Fig. 3 dargestellt. Splitting (Aufspaltung) beruht auf der Berechnung des Linearisierungsfehlers

$$D_2(\bar{f}_w^{c,i} \| f_w^{c,i}) = \int_{\mathbb{R}^2} \bar{f}_w^{c,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_k, \zeta) \left( \ln \left( \frac{\bar{f}_w^{c,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_k, \zeta)}{f_w^{c,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_k, \zeta)} \right) \right)^2 d\underline{x}_k \quad (4)$$

für jede Komponente der Gaußschen a-posteriori-Mischungsdichte. Dieses Kriterium ist dem Kullback-Leibler-Abstand [25]

$$D(\bar{f}_w^{c,i} \| f_w^{c,i}) = \int_{\mathbb{R}^2} \bar{f}_w^{c,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_k, \zeta) \ln \left( \frac{\bar{f}_w^{c,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_k, \zeta)}{f_w^{c,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_k, \zeta)} \right) d\underline{x}_k$$

zwischen der exakten a-posteriori-Dichte  $f_w^{c,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_k, \zeta)$  und ihrer Annäherung  $\bar{f}_w^{c,i}(\underline{x}_k | \hat{y}_k, \zeta)$  durch Ersetzen der nichtlinearen Messungsgleichung  $\underline{h}(\underline{x}_k)$  durch ihre Linearisierung  $\underline{\bar{h}}(\underline{x}_k)$  am Mittelwert der i-ten Komponente der a-priori-Dichtefunktion sehr ähnlich. Durch Berechnen des Linearisierungsfehlers (4) werden die am meisten zum Annäherungsfehler der a-posteriori-Dichte beitragenden Gaußschen a-priori-Mischungskomponenten identifiziert. Zur Verringerung dieses Linearisierungsfehlers werden diese Gaußschen Mischungskomponenten ersetzt, indem sie in mehrere Mischungskomponenten mit kleineren Kovarianzen unter Verwendung von Aufspaltungsbibliotheken aufgespaltet werden, die off-line optimiert worden sind (siehe Fig. 4).

Nach dieser "analytischen Neuabtastung" der a-priori-Dichte kann der Filterschritt durch eine Bank von EKF, Linearisie-



rung der Messungsgleichung am Mittelwert jeder Komponente der Darstellung der Gaußschen Mischung der a-priori-Dichte berechnet werden.

- 5    Danach wird Redundanz durch einen Zusammenführungsschritt verringert, indem mehrere Gaußsche Mischungskomponenten in eine einzige Gaußsche mit vernachlässigbarem Annäherungsfehler kombiniert werden.
- 10   Anpassung des Messungsmodells für Vereinfachungen des Linearisierungsfehlerkriteriums

Für Gaußsches Messungsrauschen kann der Linearisierungsfehler (4) analytisch als lineare Kombination von Momenten der Dichte  $\bar{f}_s^{a,t}(\underline{x}_k|\hat{y}_{k,\zeta})$  für polynomische Messungsgleichungen  $h_\zeta(\underline{x}_k)$  berechnet werden. In diesem Unterabschnitt wird daher eine Anpassung der Messungsgleichung (3) abgeleitet. Nach einigen algebraischen Umwandlungen kann die quadrierte Messungsgleichung

20

$$\underbrace{(\hat{y}_{k,\zeta} - \Delta_\zeta)^2}_{= \hat{z}_{k,\zeta}} = \|\underline{x}_k - \underline{m}_\zeta\|_{P_\zeta^{-1}}^2 + \underbrace{(2(\hat{y}_{k,\zeta} - \Delta_\zeta)v_\zeta - v_\zeta^2)}_{= \hat{v}_\zeta} \quad (5)$$

als polynomische Funktion mit einem abgeänderten "Messwert"  $\hat{z}_{k,\zeta}$  und der transformierten Ungewissheit  $\hat{v}_\zeta$  neu geschrieben werden. Aufgrund der nichtlinearen Transformation der Zufallsvariablen  $u_\zeta$  ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f_{v,\zeta}(\hat{v}_\zeta)$  nicht länger Gaußisch. Im Lokalisierungsexperiment im Abschnitt 5 werden die exakten Momente erster und zweiter Ordnung von  $\hat{v}_\zeta$  berechnet, um eine Gaußsche Annäherung von  $f_{v,\zeta}(\hat{v}_\zeta)$  zu bestimmen. Man beachte, dass die Momente von  $\hat{v}_\zeta$  vom Messwert  $\hat{y}_{k,\zeta}$  abhängig sind. Sie müssen daher für jede neue Messung der logarithmischen Empfangssignalleistung neu berechnet werden und sind nicht zeitlich unveränderlich wie die im Abschnitt 3 beschriebenen Parameter  $\mu_{u,\zeta}$  und  $\sigma_{u,\zeta}$ .

35

## Benutzermodellierung durch PDSME-Prädiktions-Schritt

Ähnlich dem Filterschritt kann der PDSME auch auf die Berechnung nichtlinearer Prädiktionsschritte angewandt werden. Analog zu nichtlinearen Filterschritten besteht die Berechnung eines angenäherten Prädiktionsschritts auch aus der Auswertung eines Linearisierungsfehlers, einer Bank von linearisierten Prädiktionsschritten und der Verringerung der Anzahl von Gaußschen Mischungskomponenten in einem Zusammenführungsschritt (siehe unterer Teil der Fig. 3). In dieser Arbeit wird nur ein lineares Benutzermodell in Betracht gezogen. Der Prädiktionsschritt kann daher analytisch berechnet werden, da die a-posteriori-Dichte durch eine Gaußsche Mischungsdichte im Filterschritt angenähert worden ist.

Das Prädiktionsmodell besteht aus der linearen Zustandsgleichung

$$\underline{x}_{k+1} = \underline{x}_k + \underline{w}_k ,$$

wobei der Mittelwert  $\underline{\mu}_w$  des additiven Systemrauschens  $\underline{w}_k$  Wissen über mögliche *Richtungen* und *mittlere Schrittlängen* der Bewegung des Benutzers darstellt. Die Kovarianzmatrix  $C_w$  von  $\underline{w}_k$  gibt eine Schätzung für die Verteilung der *Schrittlängen* des Benutzers an. Für jede Komponente  $i = 1, \dots, L$  der Gaußschen Mischungsdichte wird die vorhergesagte Gaußsche Mischungskomponente dann beschrieben durch den Mittelwert

$$\underline{\mu}_{k+1}^i = \underline{\mu}_k^i + \underline{\mu}_w$$

und die Kovarianz

$$C_{k+1}^i = C_k^i + C_w .$$

Die geschätzte Position kann dann als gewichtete Überlagerung

$$\frac{\sum_{i=1}^L w_{k+1}^i \mu_{k+1}^i}{\sum_{i=1}^L w_{k+1}^i}$$

- 5 der Mittelwerte aller Gaußschen Mischungskomponenten berechnet werden.

Teil 2:

## 10 Lokalisierungsexperiment

In diesem Abschnitt wird ein reales Lokalisierungsexperiment für die Validierung des beschriebenen Lokalisierungsansatzes für DECT-Mobiltelefone dargestellt. In den Unterabschnitten

- 15 wird die überlegene Leistung des PDSME im Vergleich zum EKF-Filter (Extended Kalman Filter), einem weitverbreiteten standardmäßigen Ansatz für die Zustandsschätzung von nichtlinearen Systemen, gezeigt.

## 20 Auswertungsszenarium

In diesem Lokalisierungsexperiment sind  $N = 10$  Sender in einem Innenraum von annähernd 30 m x 30 m auf einem Stockwerk eines Gebäudes platziert worden. Bei der Modellerzeugungsphase

- 25 ist die logarithmische Empfangssignalleistung jedes Senders auf einem Gitter mit 1 m Abstand zwischen Gitterpunkten gemessen worden. Es sind  $N = 10$  Messungsgleichungen  $h_z(\underline{x}_k)$ , insgesamt bestehend aus 60 Parametern für die deterministischen Komponenten und 20 Parametern für die stochastischen
- 30 Komponenten  $\underline{v}_k$ , identifiziert worden. Außer einigen wenigen Bereichen, die durch hohe Dämpfung der Funkwellen aufgrund von Stahlbetonwänden beeinflusst wurden, ist das angenommene Modell eine zutreffende Annäherung der Verteilung der Empfangssignalleistung.

Die anfängliche Wahrscheinlichkeitsdichte der Position wird als Gaußsche Dichte mit dem Anfangsmittelwert

$$\underline{\mu}_0^p = \begin{bmatrix} 15\text{m} \\ 15\text{m} \end{bmatrix}$$

und der Anfangskovarianz

$$\underline{C}_0^p = \begin{bmatrix} 15^2 & 0 \\ 0 & 15^2 \end{bmatrix} \text{m}^2,$$

gewählt, d.h. es stehen beinahe keine Vorkenntnisse über die Position zu Verfügung.

Bei der Lokalisierungsphase wird eine Messung jedes empfangbaren Senders entlang einer Linie wie in Fig. 4 dargestellt gesammelt, mit einem Abstand von  $\Delta r = 0,5 \text{ m}$  zwischen den wahren Messstellen  $P_1, P_2, \dots, P_{17}$ . Die Positionskoordinaten der Messungen sind bestimmt worden, um die Grundwirklichkeit mit den Schätzpositionen zu vergleichen. Für die Lokalisierung des Empfängers sind weder im Lokalisierungsansatz mit dem PDSME noch mit dem EKF die genauen Messpositionen benutzt worden. Nachdem die Messungsaktualisierung für jeden empfangbaren Sender an einer festen Stelle  $P_i, i = 1, \dots, 17$  berechnet worden ist, ist ein Prädiktionsschritt nach Unterabschnitt 4.3 berechnet worden. Im vorliegenden Beispiel wird das einfache Benutzermodell definiert durch den Mittelwert

$$\underline{\mu}_w = \underline{0}\text{m}$$

und die Kovarianz

$$\underline{C}_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{m}^2,$$

d.h. es steht keine Kenntnis über eine bevorzugte Richtung der Bewegung des Benutzers zur Verfügung. Durch die Kovari-

anzmatrix  $C_0$  wird nur die Verteilung der Schrittlängen des Benutzers dargestellt.

#### EKF-Filter (Extended Kalman Filter)

5

Bei Verwendung des EKF-Filters wird die Messungsgleichung (5) am Mittelwert der a-priori-Dichtefunktion linearisiert. In der Fig. 5 sind die Ergebnisse des EKF für den ersten und den 170sten Filterschritt dargestellt. Bei jedem Filterschritt  
10 wird die Messung der logarithmischen Empfangssignalleistung eines einzigen Senders zur Aktualisierung der geschätzten Position benutzt.

Es ist ersichtlich, dass es nach dem ersten Filterschritt einen bedeutenden Schätzungsfehler gibt. Die wahre Position des Empfängers liegt nicht innerhalb der Stützwerte der geschätzten a-posteriori-Dichtefunktion, die durch ihre Profildarstellung gezeigt wird. Weiterhin gibt es keine Kreuzungsstelle zwischen der wahren Messungsgleichung und der geschätzten  
15 Dichte. Es ist daher nicht möglich, Datenvalidierungsverfahren anzuwenden, um festzustellen, ob ein Messwert durch die geschätzte Dichte "erläutert" werden kann.  
20

#### PDSME (Prior Density Splitting Mixture Estimator)

25

In der Fig. 6 werden die durch den PDSME-Algorithmus geschätzten a-posteriori-Dichten auch für den ersten und 170sten Filterschritt dargestellt. Die Annäherung der nicht-Gaußschen a-posteriori-Dichte im ersten Filterschritt, die  
30 der numerisch berechneten optimalen Bayeschen Lösung des Filterschritts sehr nahe liegt, ist eindeutig viel besser als im Fall des EKF-Filters. Es können daher nunmehr Datenvalidierungsverfahren erfolgreich angewandt werden.

35 In der Fig. 7 werden die Erwartungswerte der mit dem EKF und dem PDSME berechneten a-posteriori-Dichtefunktionen mit der wahren Position verglichen. Wenn man diese Figur mit Fig. 8

vergleicht, ist ersichtlich, dass für beinahe lineare Filterprobleme, d.h. wenn die Kovarianz der Schätzposition im Vergleich mit der Nichtlinearität der Messungsgleichung nach mehreren Filterschritten klein ist, EKF und PDSME beinahe  
 5 dieselben Ergebnisse bringen. In diesen Fällen benutzt der PDSME nur eine bescheidene Anzahl von Gaußschen Mischungskomponenten während für starke Nichtlinearitäten zu Beginn des Lokalisierungsexperiments eine höhere Anzahl von Annäherungskomponenten notwendig ist, um den Schätzungsfehler zu verringern. Die überlegene Leistung des PDSME-Filters im Vergleich  
 10 mit dem EKF wird auch durch den Durchschnitts-Schätzfehler

$$\frac{1}{N_F} \sum_{k=1}^{N_F} \sqrt{\|\underline{x}_k^{\text{true}} - \underline{x}_k^{\text{estimated}}\|_2^2}$$

15 über die  $N_F = 170$  Filterschritte gezeigt, der 3,30 m für den EKF und 1,22 m für den PDSME beträgt.

### Schlussfolgerungen

20 In dieser Arbeit ist ein stochastischer Ansatz für die Lokalisierung von Funkkommunikationsvorrichtungen geboten worden, der auf dem Messen der logarithmischen Signalleistung der empfangbaren Sender durch eine Mobilstation beruht. Für jeden Sender ist ein stochastisches Messungsmodell identifiziert  
 25 worden, das aus einer deterministischen und einer stochastischen Komponente besteht. Dieses Messungsmodell ist für die Schätzung der Position des Empfängers durch einen neuartigen Gaußschen Mischungsschätzer benutzt worden, der auf dem Aufspalten der a-priori-Dichte entsprechend einem Linearisierungsfehlerkriterium beruht. Dieses Kriterium ist dem Kullback-Leibler-Abstand zwischen der wahren und der angenäherten a-posteriori-Dichte sehr ähnlich, die durch eine Linearisierung der Messungsgleichung berechnet wird. Durch Anwendung dieses Schätzungsverfahrens auf die Lokalisierung von DECT-  
 30 Mobiltelefonen können bedeutende Verbesserungen der Schät-

35

zungsgüte erreicht werden, wenn statt der standardmäßigen Ansätze wie dem EKF der PDSME benutzt wird. Weitere Verbesserung der Lokalisierungsgüte kann durch Identifizieren besser deterministischer Messungsmodelle und genauere Kennzeichnungen des Messungsrauschens erreicht werden, die keine Unabhängigkeit zwischen den in dieser Arbeit erwähnten verschiedenen Ungewissheiten annehmen.

In diesem Dokument sind folgende Schriften zitiert:

- 5 [1] Rappaport T.S., Reed J.H. et al., "Position Location Using Wireless Communications on Highways of the Future", IEEE Communication Magazine, S. 33 - 41, Okt. 1996.
- [2] DE 198 36 778 A1
- 10 [3] TS 25.305 V3.1.0: stage 2 "Functional Specification of Location Services in UTRAN" (release 99), 3GPP TSG-RAN-WG2, 2000
- [4] United States Patent, Patent Number 5,883,598
- 15 [5] United States Patent, Patent Number 6,094,168
- [6] United States Patent, Patent Number 6,108,553
- 20 [7] Eberspächer, J.; Vögel, H.-J.: GSM. Global System for Mobile Communication. Stuttgart, Leipzig: Teubner, 1999
- [8] Jung. P.: Analyse und Entwurf digitaler Mobilfunksysteme. Stuttgart, Leipzig: Teubner, 1997
- 25 [9] Kennemann, O.: Lokalisierung von Mobilstationen anhand ihrer Funkmessdaten. Nummer 11 in Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation. Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1997.
- 30 [10] Rauh Andreas, "Nonlinear Measurement Update And Prediction: PRIOR DENSITY SPLITTING MIXTURE ESTIMATOR", submitted to IEEE Transactions on Automatic Control, Dezember 2002;
- 35 [11] The Digital Cordless Telecommunications Standard for the World, erhältlich am 24.04.2003 unter:



<http://www.dectweb.com/dectforum/aboutdect/aboutdect.htm>

- 5 [12] T. Roos, P. Myllymäki, and H. Tirri, "A Statistical Modeling Approach to Location Estimation", IEEE Transactions on Mobile Computing 1, pp. 59-69, January-March 2002
- 10 [13] A. M. Ladd, K. E. Bekris, G. Marceau, A. Rudys, D. S. Wallach, and L. E. Kavraki, "Using Wireless Ethernet for Localization", in Proceedings of the 2002 IEEE/RSN Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 402-408, EPFL, (Lausanne, Switzerland), October 2002.
- 15 [14] J. C. Chen, R. E. Hudson, and K. Yao, "Maximum-Likelihood Source Localization and Unknown Sensor Location Estimation for Wideband Signals in the Near-Field", IEEE Transaction on Signal Processing 50, August 2002.
- 20 [15] N. Bergmann, L. Ljung, and F. Gustafsson, "Terrain Navigation Using Bayesian Statistics", IEEE Control Systems Magazine 19, pp. 33-40, June 1999.
- 25 [16] N. Bergmann, Recursive Bayesian Estimation: Navigation and Tracking Applications. PhD thesis, Linköping University, Department of Electrical Engineering, 1999.
- 30 [17] S. Panzieri, F. Pascucci, and G. Ulivi, "An Outdoor Navigation System Using GPS and Inertial Platform", IEEE/ASME Transaction on Mechatronics 7, pp. 134-142, June 2002.
- 35 [18] B. H. Fleury and P. E. Leuthol, "Radiowave Propagation in Mobile Communications: An Overview of European Research," IEEE Communication Magazine 23(2), pp. 70-81, 1996.

- [19] K. Ito and K. Xiong, "Gaussian Filters for Nonlinear Filtering Problems," IEEE Transactions on Automatic Control 45, pp. 910-927, May 2000.
- 5 [20] D. Alspace and H. Sorenson, "Nonlinear Bayesian estimation using Gaussian sum approximations," IEEE Transactions on Automatic Control 17, pp. 439-448, 1972
- 10 [21] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems", Trans. ASME, J. Basic Eng. Series 82D, pp. 35-45, 1960.
- [22] F. C. Schweppe, Uncertain Dynamic Systems, Prentice-Hall, New York, 1973.
- 15 [23] A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, McGraw-Hill, Tokyo, 1965.
- 20 [24] J. Lähteenmäki, "Radiowave Propagation in Office Buildings and Underground Halls", in Proc. 22<sup>nd</sup> European Microwave Conference EurMC'92, pp. 377-382 (Espoo, Finland), 1992.
- 25 [25] S. Kullback and R. A. Leibler, "On Information and Sufficiency", Annals of Mathematical Statistics 22, pp. 79-86, 1951.
- 30 [26] U. D. Hanebeck, K. Briechle, and A. Rauh, "Progressive Bayes: A New Framework for Nonlinear State Estimation," in Proceedings of SPIE AeroSense Symposium, 5099, (Orlando, Florida), April 2003.
- 35 [27] M. Hellebrandt and R. Mathar, "Location Tracking of Mobiles in Cellular Radio Networks," IEEE Transactions on Vehicular Technology 48, pp. 1558-1562, September 1999.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung einer ausgewählten Position einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz mit mindestens einer ersten Basisstation, eingerichtet zu einer ersten Kommunikation mit der mobilen Kommunikationseinrichtung mittels erster Kommunikationssignale, unter Verwendung eines nichtlinearen Kommunikationsmodells mit einem deterministischen Anteil und einem stochastischen Anteil,

- welcher deterministische Anteil eine Abhängigkeit zwischen Kommunikationssignale einer Basisstation und Positionen der mobilen Kommunikationseinrichtung beschreibt und
- welcher stochastische Anteil eine Unsicherheit des deterministischen Anteils beschreibt,
- bei dem unter Verwendung des zu der ausgewählten Position zugehörigen ersten Kommunikationssignals der ersten Basisstation und dem nicht-linearen Kommunikationsmodell die ausgewählte Position ermittelt wird,
- wobei bei der Ermittlung eine nichtlineare Bayesianische Filtertechnik angewandt wird, wodurch ein mögliches Aufenthaltsgebiet der ausgewählten Position bestimmt wird, aus welchem die ausgewählte Position ermittelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

bei dem mindestens eine zweite Basisstation, eingerichtet zu einer zweiten Kommunikation mit der mobilen Kommunikationseinrichtung mittels zweiter Kommunikationssignale, verwendet wird, wobei unter Verwendung des zu der ausgewählten Position zugehörigen ersten Kommunikationssignals und/oder des zu der ausgewählten Position zugehörigen zweiten Kommunikationssignals und dem nicht-linearen Kommunikationsmodells die ausgewählte Position ermittelt wird.

3.Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,  
bei dem unter Verwendung des ersten und/oder des zweiten Kommunikationssignals ein und/oder mehrere entfernungsabhängige Parameter ermittelt werden bzw. wird, welche bzw. welcher von  
5 einer Entfernung der mobilen Kommunikationseinrichtung zu einer von den Basisstationen abhängen bzw. abhängt und unter Verwendung dessen oder derer das mögliche Aufenthaltsgebiet ermittelt werden bzw. wird.

10 4.Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
bei dem die Unsicherheit des deterministischen Anteils eine Unsicherheit der Kommunikationssignale, insbesondere ein Messrauschen, und/oder eine Unsicherheit der Abhängigkeit, insbesondere eine Unsicherheit des Kommunikationsmodells,  
15 sind bzw. ist.

5.Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
bei dem das zu der ausgewählten Position zugehörige erste Kommunikationssignal zeitabhängig ist und/oder für einen  
20 Zeitpunkt  $k$  gemessen wird.

6.Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
bei dem die nichtlineare Bayesianische Filtertechnik iterativ angewandt wird.

25 7.Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
bei dem als die nichtlineare Bayesianische Filtertechnik ein Gausscher Mischfilter-Algorithmus oder ein Kalman Filter, insbesondere ein Extended Kalman Filter, verwendet wird.

30 8.Verfahren nach Anspruch 7,  
bei dem der Gaussche Mischfilter-Algorithmus ein Prior Density Splitting Mixture Estimator (PDSME) ist.

35 9.Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
bei dem ein Benutzermodell verwendet wird, welches eine Bewegung der mobilen Kommunikationseinrichtung beschreibt.

10. Verfahren nach Anspruch 9,  
bei dem unter Verwendung des Benutzermodells die Bewegung der  
mobilen Kommunikationseinrichtung für einen Zeitschritt be-  
grenzt wird.

5

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10,  
bei dem unter Verwendung des Benutzermodells eine Positions-  
schätzung für die ausgewählte Position ermittelt wird.

10

12. Verfahren nach Anspruch 11,  
bei dem die Positionsschätzung unter Anwendung der nichtline-  
aren Bayesianischen Filtertechnik ermittelt wird.

15

13. Verfahren nach Anspruch 11 oder 12,  
bei dem die Positionsschätzung als ein Startwert für die Er-  
mittlung des möglichen Aufenthaltsgebiet der ausgewählten Po-  
sition durch die Anwendung der nichtlinearen Bayesianischen  
Filtertechnik verwendet wird.

20

14. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
bei dem das Kommunikationsnetz ein WLAN-, GSM- oder DECT-Netz  
ist.

25

15. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
bei dem als ausgewählte Position der mobilen Kommunika-  
tions-einrichtung ein Kennwert des möglichen Aufenthaltsgebiets,  
insbesondere ein Schwerpunkt oder ein Erwartungswert des mög-  
lichen Aufenthaltsgebiets, verwendet wird.

30

16. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche,  
eingesetzt zur Lokalisierung eines Mobiltelefons in einem di-  
gitalen, zellularen Mobilfunknetz, insbesondere in einem GSM-  
Netz,

35

wobei die mobile Kommunikationseinrichtung das Mobiltelefon,  
die erste Basisstation eine gesprächsführende Basisstation in  
dem Mobilfunknetz ist.

17. Anordnung zur Ermittlung einer ausgewählten Position einer mobilen Kommunikationseinrichtung in einem Kommunikationsnetz mit mindestens einer ersten Basisstation, eingerichtet zu einer ersten Kommunikation mit der mobilen Kommunikationseinrichtung mittels erster Kommunikationssignale,  
5 unter Verwendung eines nichtlinearen Kommunikationsmodells mit einem deterministischen Anteil und einem stochastischen Anteil,

- welcher deterministische Anteil eine Abhängigkeit zwischen Kommunikationssignalen einer Basisstation und Positionen der mobilen Kommunikationseinrichtung beschreibt und  
10

- welcher stochastische Anteil eine Unsicherheit des deterministischen Anteils beschreibt,

15 - mit einer Positionsermittlungseinheit, die derart eingerichtet ist, dass unter Verwendung des zu der ausgewählten Position zugehörigen ersten Kommunikationssignals der ersten Basisstation und dem nicht-linearen Kommunikationsmodell die ausgewählte Position ermittelbar ist,

20 - wobei bei der Ermittlung eine nichtlineare Bayesianische Filtertechnik angewandt wird, wodurch ein mögliches Aufenthaltsgebiet der ausgewählten Position bestimmt wird, aus welchem die ausgewählte Position ermittelt wird.

25 18. Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln, um alle Schritte gemäß Anspruch 1 durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird.

30 19. Computerprogramm mit Programmcode-Mitteln gemäß Anspruch 18, die auf einem computerlesbaren Datenträger gespeichert sind.

35 20. Computerprogramm-Produkt mit auf einem maschinenlesbaren Träger gespeicherten Programmcode-Mitteln, um alle Schritte gemäß Anspruch 1 durchzuführen, wenn das Programm auf einem Computer ausgeführt wird.

1/7

FIG 1

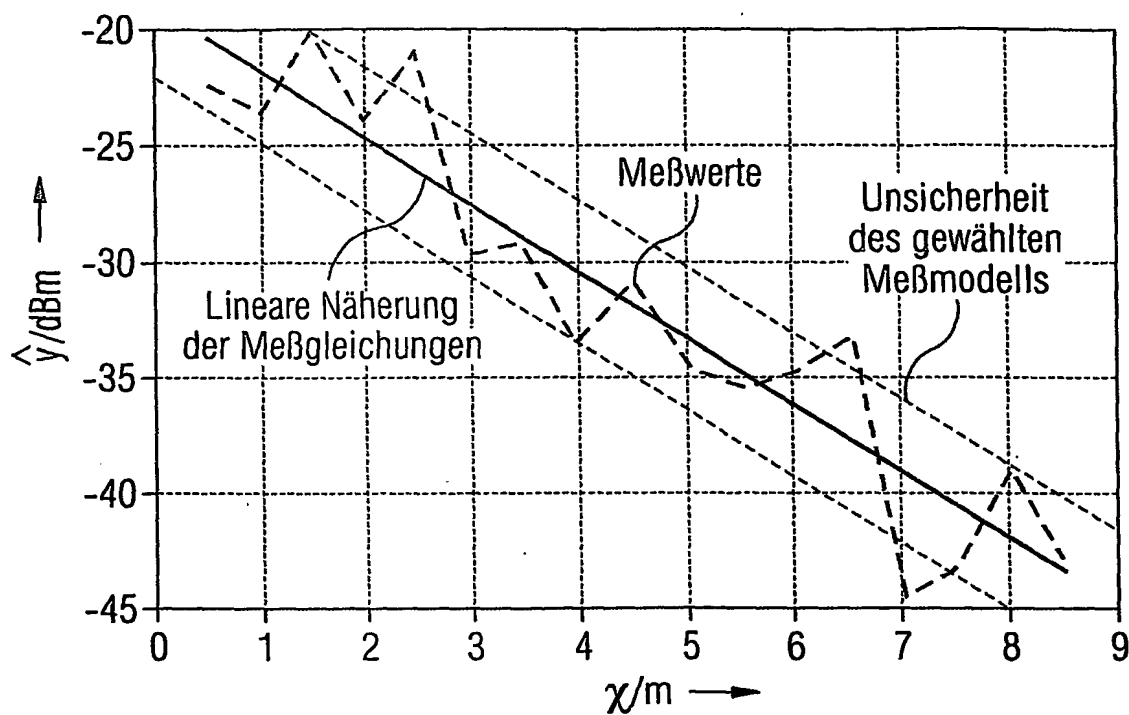
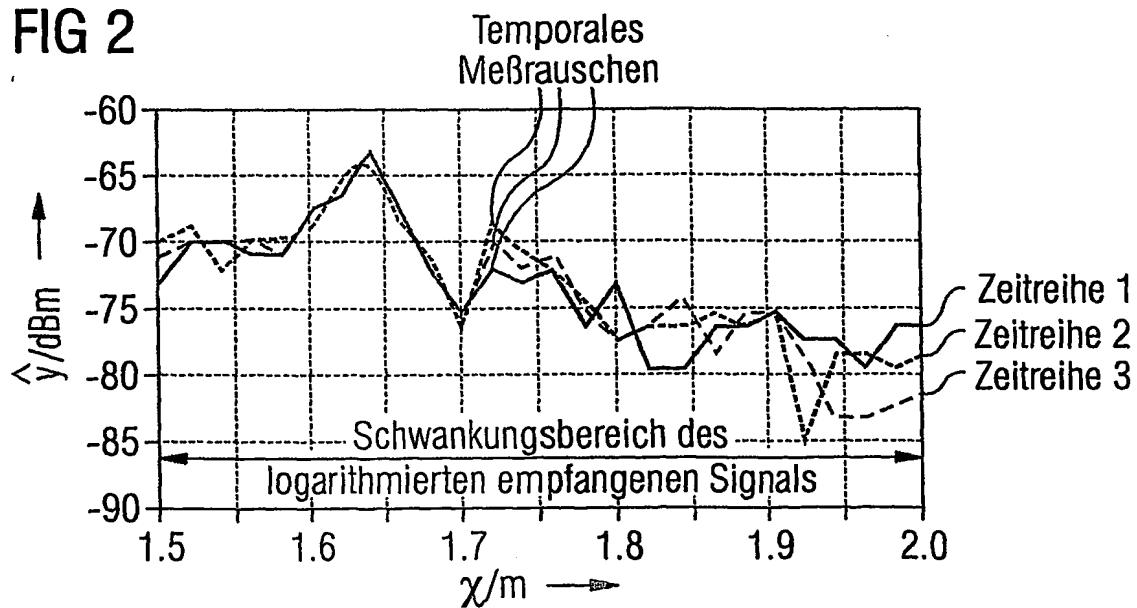


FIG 2



2/7

FIG 3

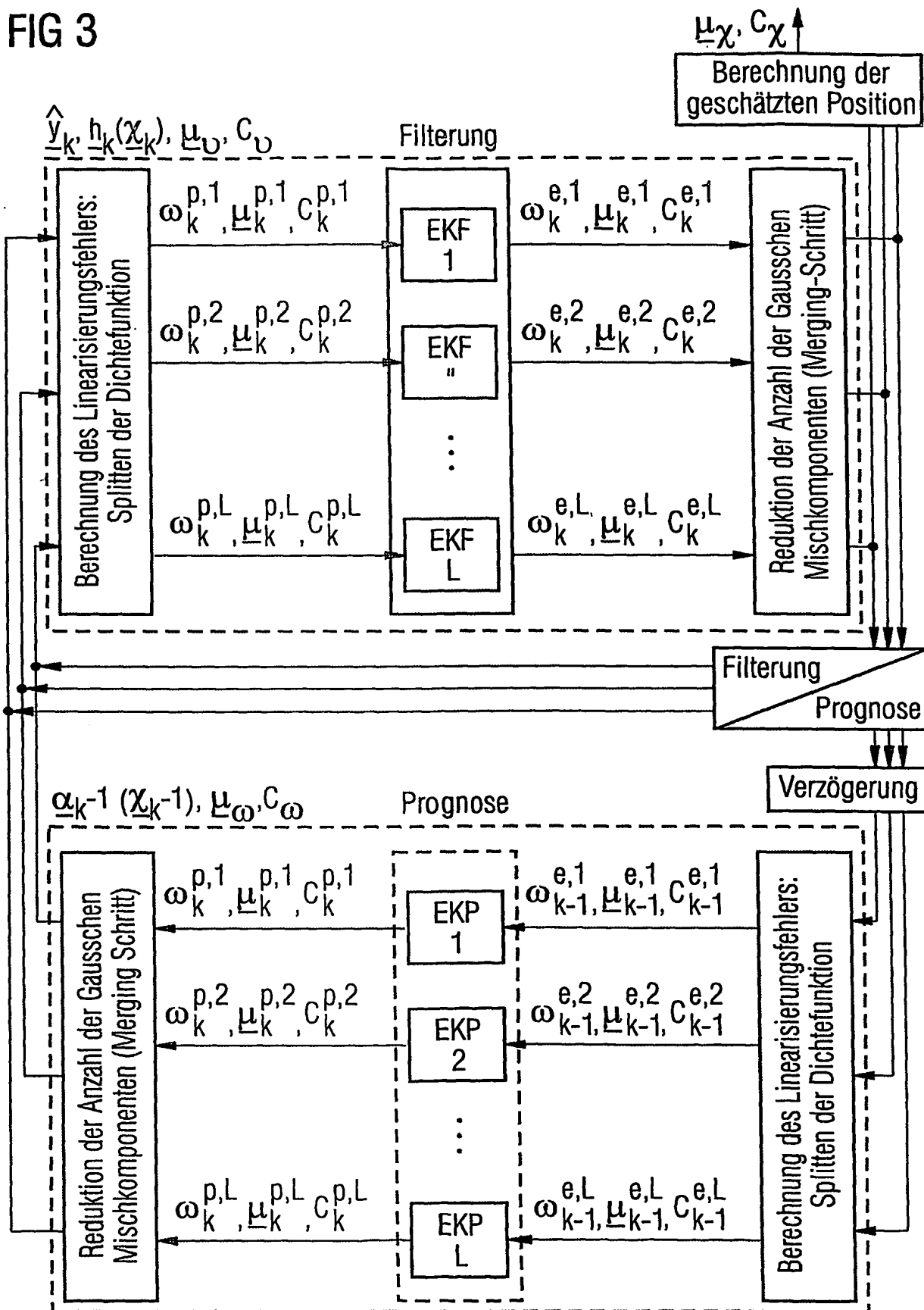




FIG 4A

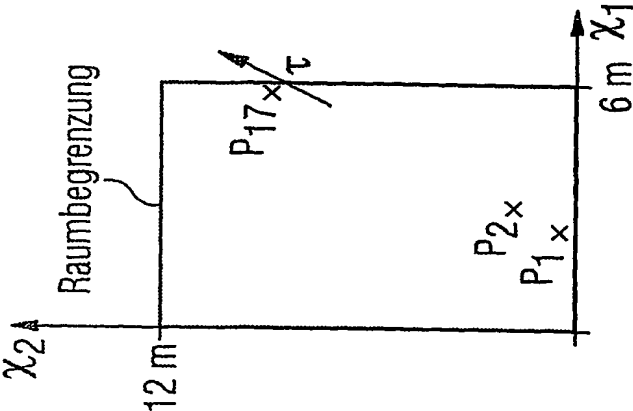


FIG 4B

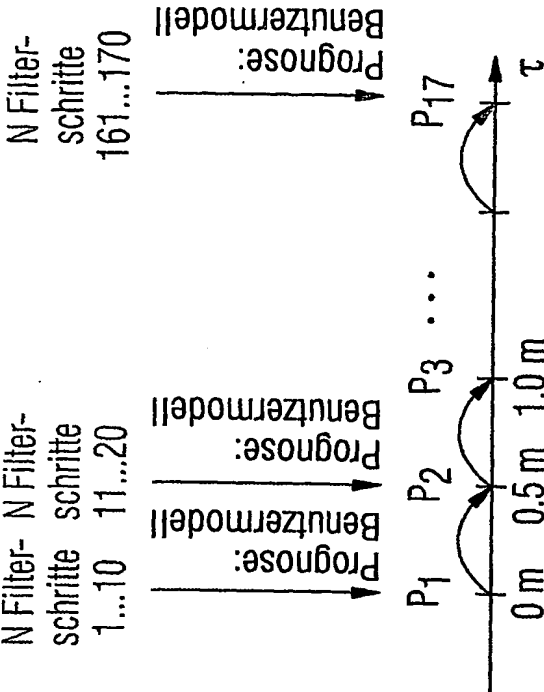


FIG 5B

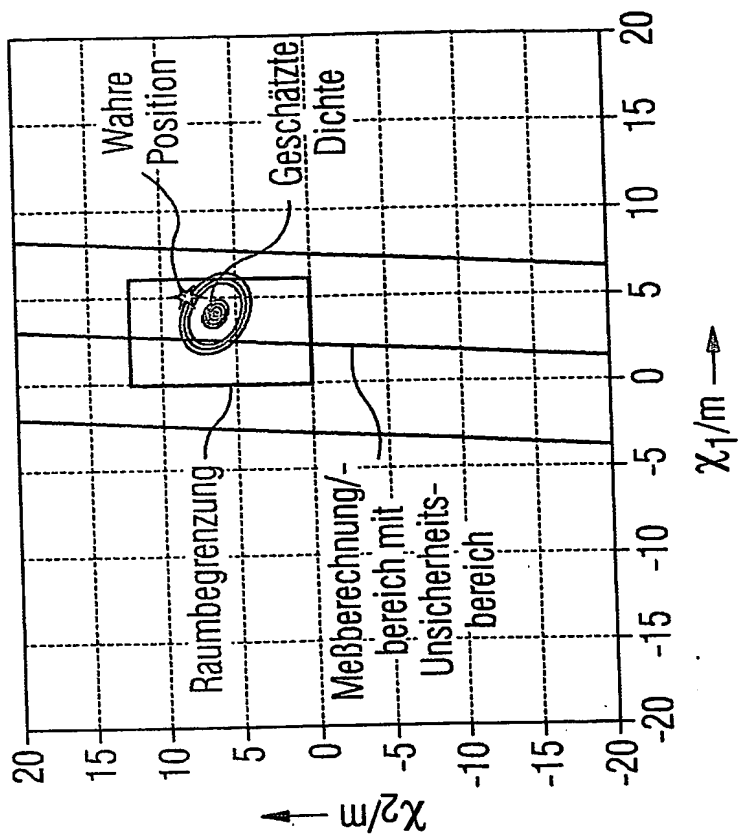


FIG 5A

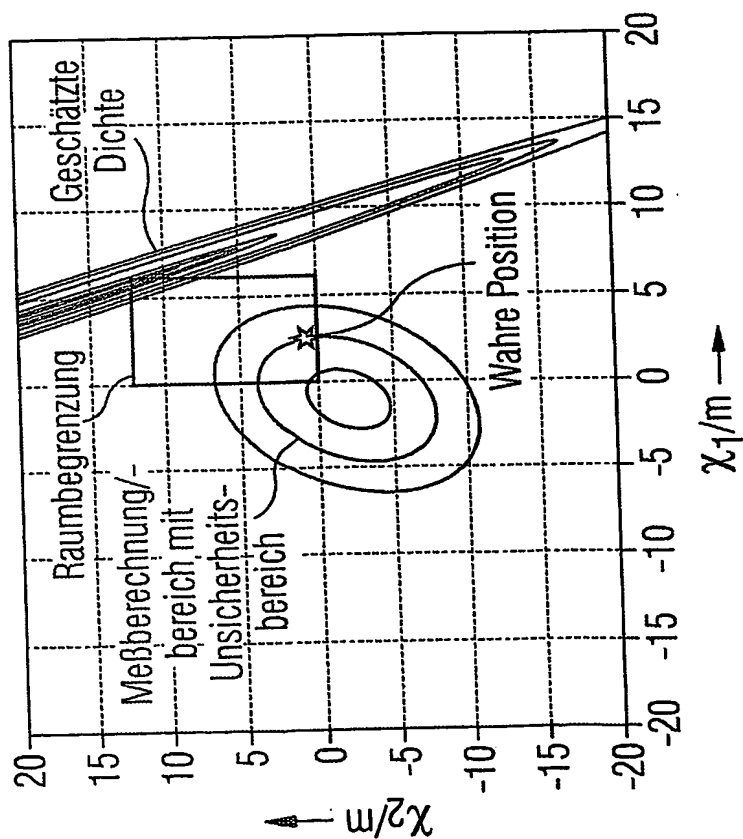


FIG 6B

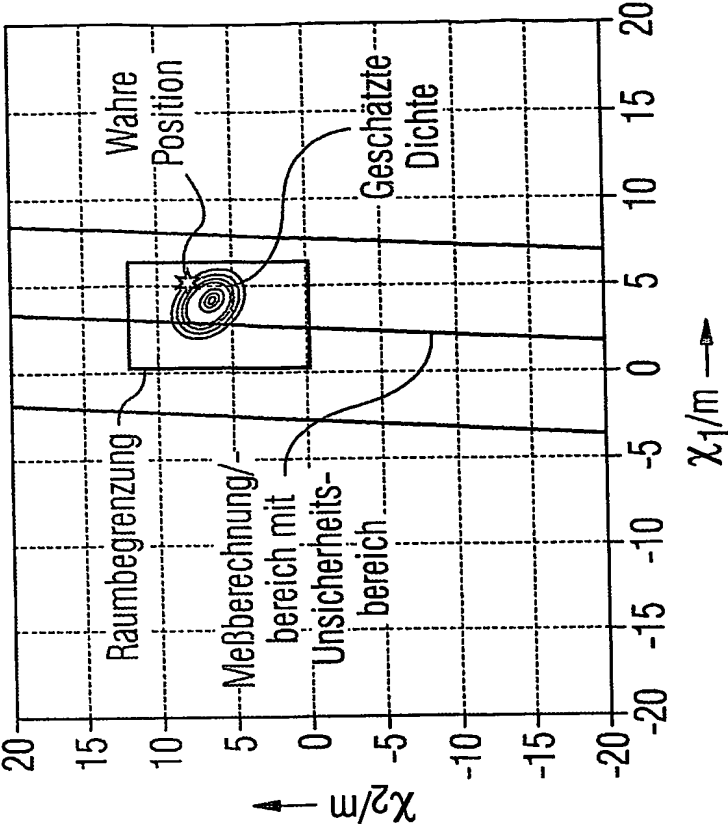


FIG 6A

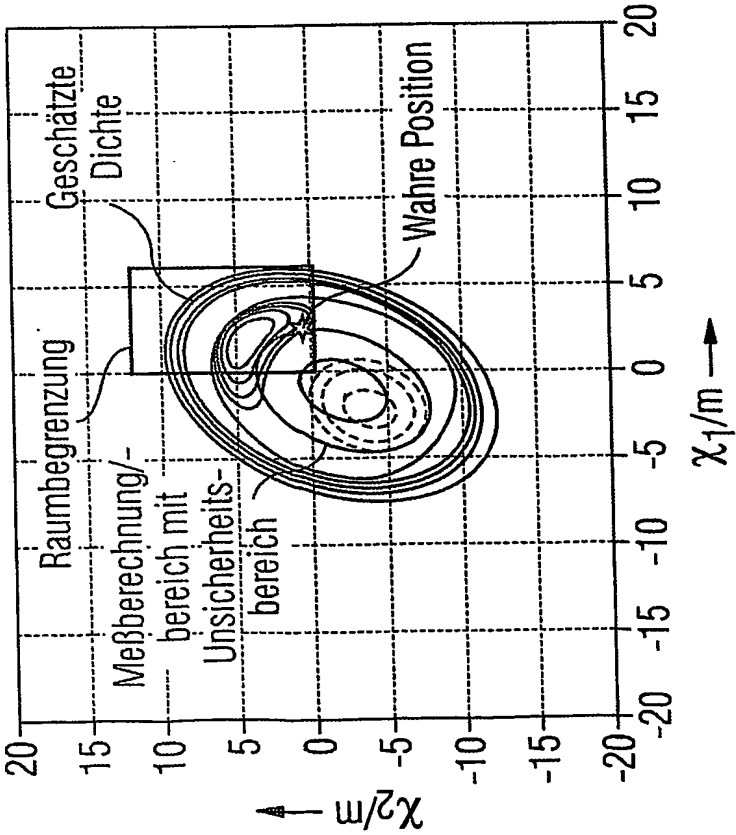


FIG 7A

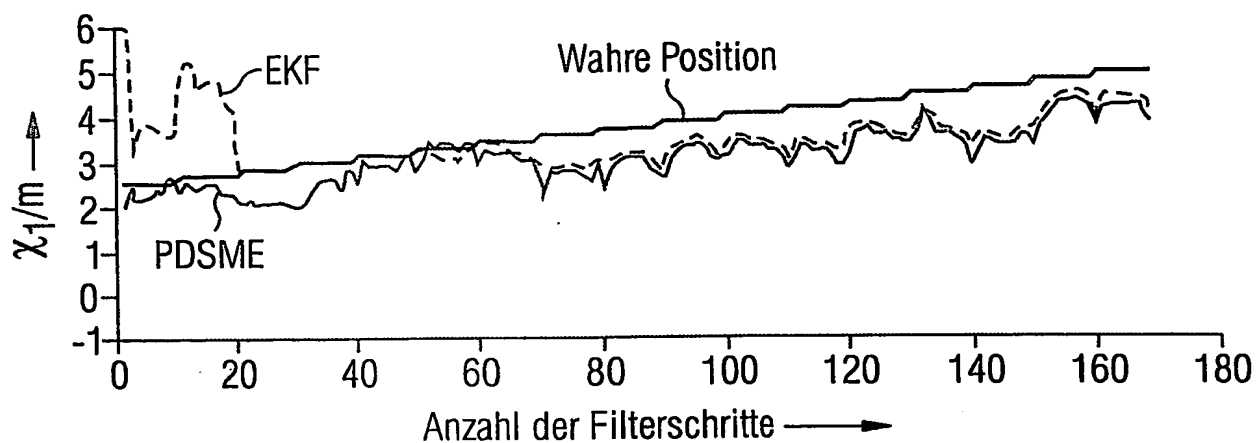
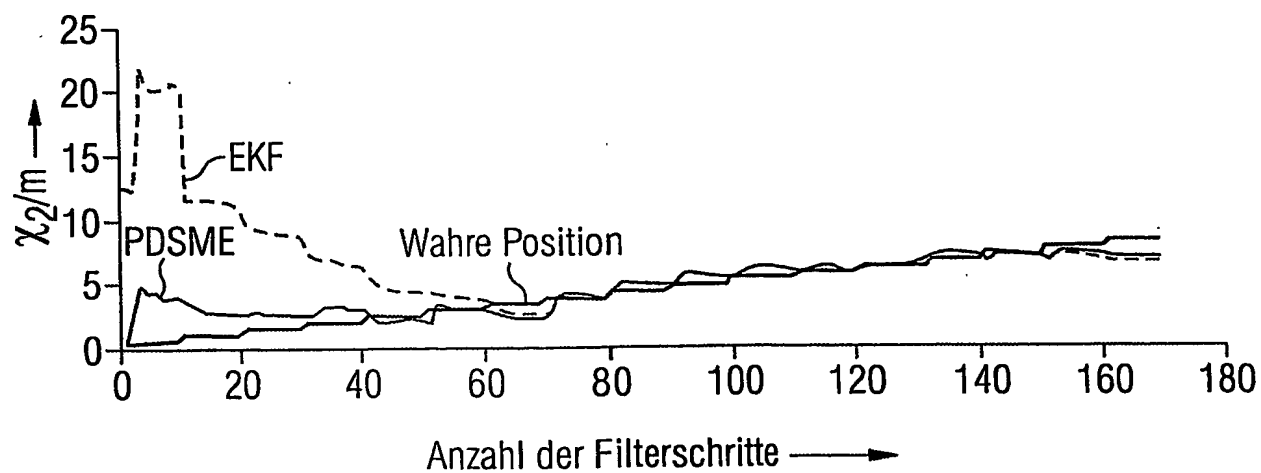


FIG 7B



7/7

FIG 8

